

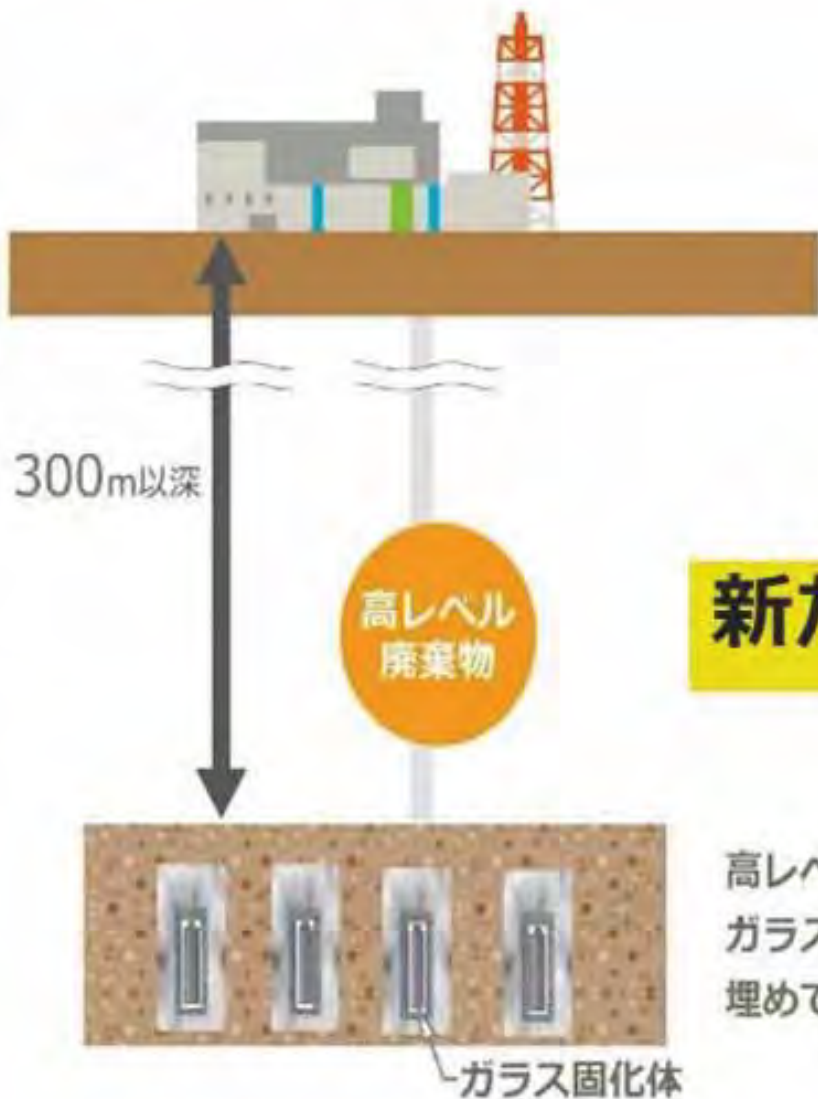
革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)  
**「核変換による高レベル放射性廃棄物の  
大幅な低減・資源化」**  
成果報告

元 科学技術振興機構  
ImPACT プログラム・マネージャー  
藤田 玲子

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです

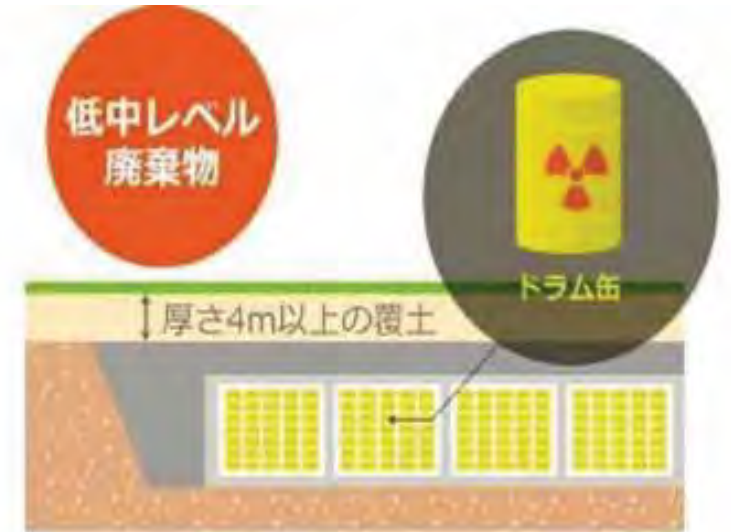
ImPACT (Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program)

## 現在の処分計画



## 新たな選択肢

高レベル放射性廃棄物を  
ガラス固化して地層深くに  
埋めて処分



高レベル放射性廃棄物を中低レベルに。  
その一部のレアメタルなどを再利用



## 現在の処分計画

## 同位体分離法を用いない方法を検討

## 目指すところ



高レベル放射性廃棄物の**資源化** (再利用) と **低減化** (中低レベル化) (分離回収と核変換) を実現するプラント概念の提示

高レベル廃棄物から**長寿命核分裂生成物(LLFP)\***を回収し、同位体分離をせずに核変換により半減期の短い核種や安定核種にする**プロセス概念**を構築し、その**プラントの概念**を設計する。

- ① LLFPを回収する**プロセスの最適化**(化学・偶奇分離)
- ② 合理的な**核変換反応のデータの測定・選定**および**Pd-107の実証**
- ③ 選定した核変換反応を実現する**加速器の開発**
- ④ LLFP回収から核変換する**プラントの概念設計**
- ⑤ HLWを中レベル廃棄物(ILW)や低レベル廃棄物(LLW)へ転換:  
**中深度処分にするシナリオの提案**  
**HLWのレアメタルの資源化の提案:**

**クリアランスレベルの提案と確立**

\*LLFP: Se-79, Zr-93, Pd-107, Cs-135 (既に検討済Tc-99, I-129, 今後検討要Sn-126)

# プログラム構成



再処理プロセスの改良・高度化WG  
 ✓企業等4機関が参画

Project 1 分離回収

- LLFP分離回収技術の開発
- レーザーによる偶奇分離法  
の開発

Project 2 核反応データ取得

- 新しい核反応データの取得
- 核変換実証実験の実施

Project 3 シミュレーション

- 核反応標準モデルの整備
- 巨視的な核反応シミュレーションの構築
- 核反応データベースの構築

Project 5 プロセス概念検討  
(提示)

- 高レベル放射性廃棄物の処分負担  
低減
- クリアランスレベルの検討
- 全体システム概念の構築

Project 4 核変換システムと  
要素技術開発

- 加速器要素技術の開発
- 核変換誘発粒子発生のための加速器システム評価

処分検討WG  
 ✓企業等4機関が参画

加速器検討WG  
 ✓企業等5機関が参画

核変換プラント社会実装 2040~

パイロットプラントを使った実証 ~2035

自動車用触媒 磁石材料等 核医療  
 パラジウム ネオジム ジスプロシウム セシウム  
 イットリウム モリブデン ロジウム ジルコニウム

安全な廃棄物  
 バリウム セシウム  
 ストロンチウム セレン

## 高レベル放射性廃棄物(HLW)の低減化に目途

- ①HLW廃棄物の低減化のシナリオとして**中深度処分\***の概念適用
- ②**偶奇分離法**(同位体分離法を使わず)と**加速器**(世界初の**処理用加速器のプラント概念**の設計完成)による核変換(経済性のある核変換法)

## 高レベル放射性廃棄物(HLW)の資源化に目途

- ①**偶奇分離法**(実機の1/350の装置概念を完成)
- ②偶奇分離法と加速器による核変換
- ③**クリアランスレベル\*\***(Pd-107およびZr-93のクリアランスレベルの提案と受理:ICRP⇒IAEA)

\*:中深度処分:深さ70m~150m以深での処分(詳細は後述)

\*\*:**どんな使い方でも健康に問題ない放射能のレベル**

# ②プログラムの成果：本発明の技術

H30年度 発明協会 21世紀発明賞受賞

従来の技術

将来の技術

発想の転換による  
 技術的課題の解決



課題

解決法

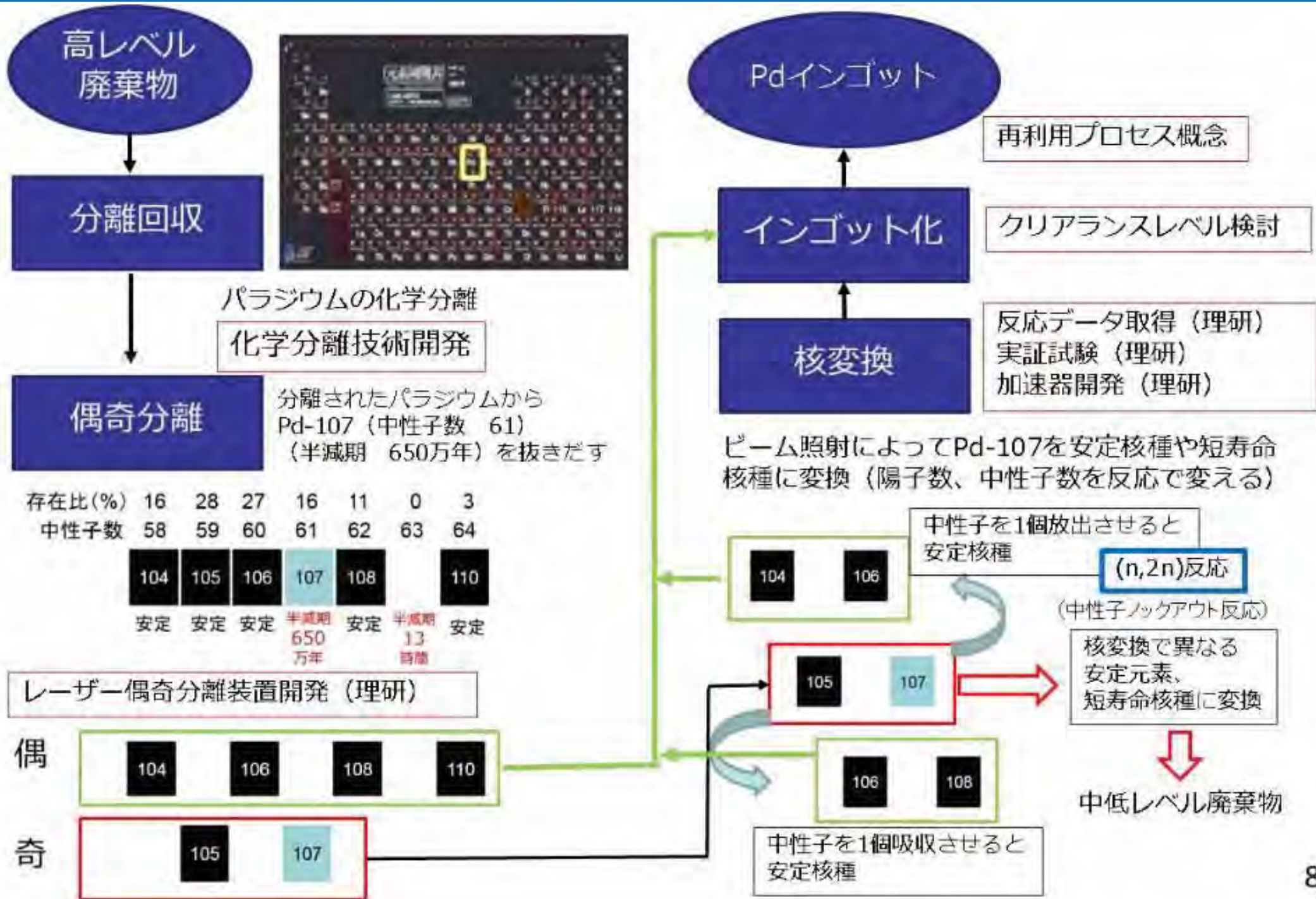
- 同位体分離法
- ・同位体シフトが小さく技術的困難
  - ・生産性が低い
  - ・適用核種の範囲が限定
  - ・効率性の問題 (レーザー法)
  - ・プラント規模という経済性 (遠心分離法・ガス拡散法)

- 同位体分離なし → 偶奇分離法
- ・レーザーによる大幅な効率性と生産性の向上
  - ・適用核種範囲の拡大
  - ・市販装置の組み合わせによる小規模化

- +
- 加速器
- ・中性子により長寿命核分裂生成物(LLFP)の奇数の核種のみを選択的に変換する

受賞理由：  
 原子炉中性子と同位体分離で核変換できなかったLLFPを偶奇分離と加速器で核変換可能とした

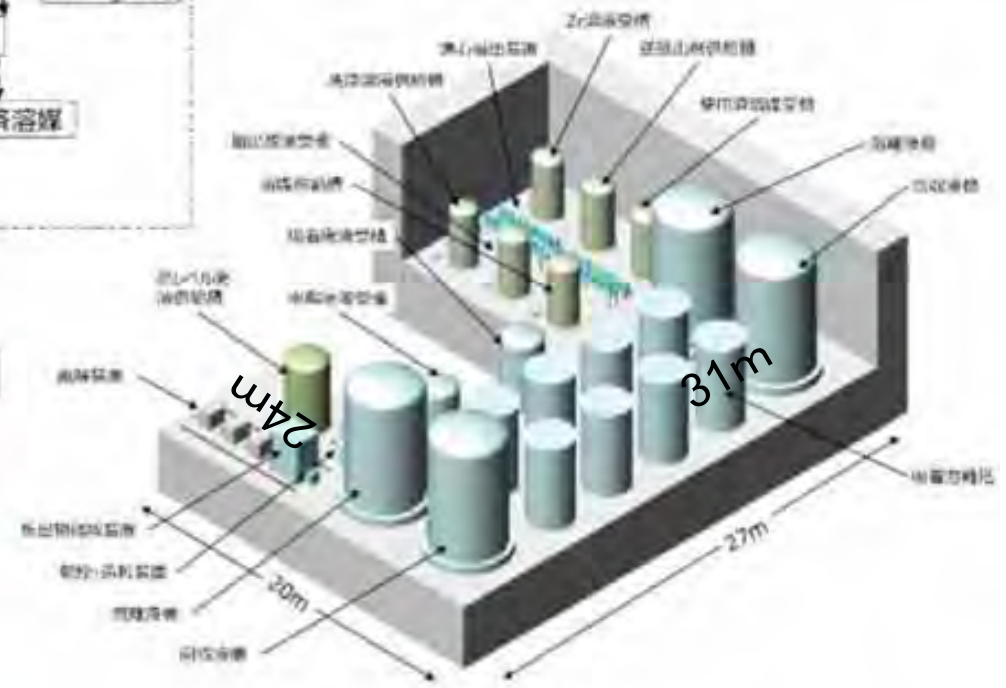
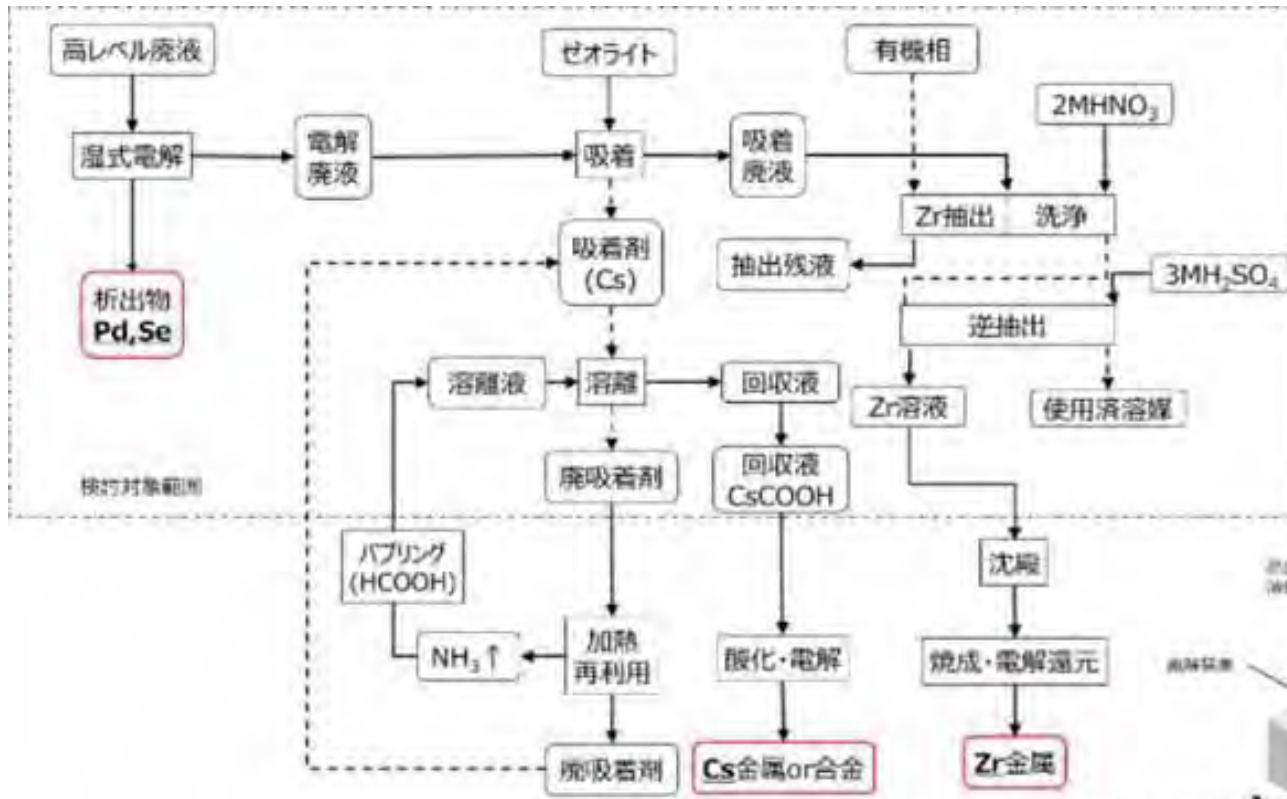
# 例：Pd-107の分離核変換プロセス





## 【プラント概念の前提条件】

高レベル廃液処理量：520m<sup>3</sup>/年、年間処理日数：200日



プロセスフロー

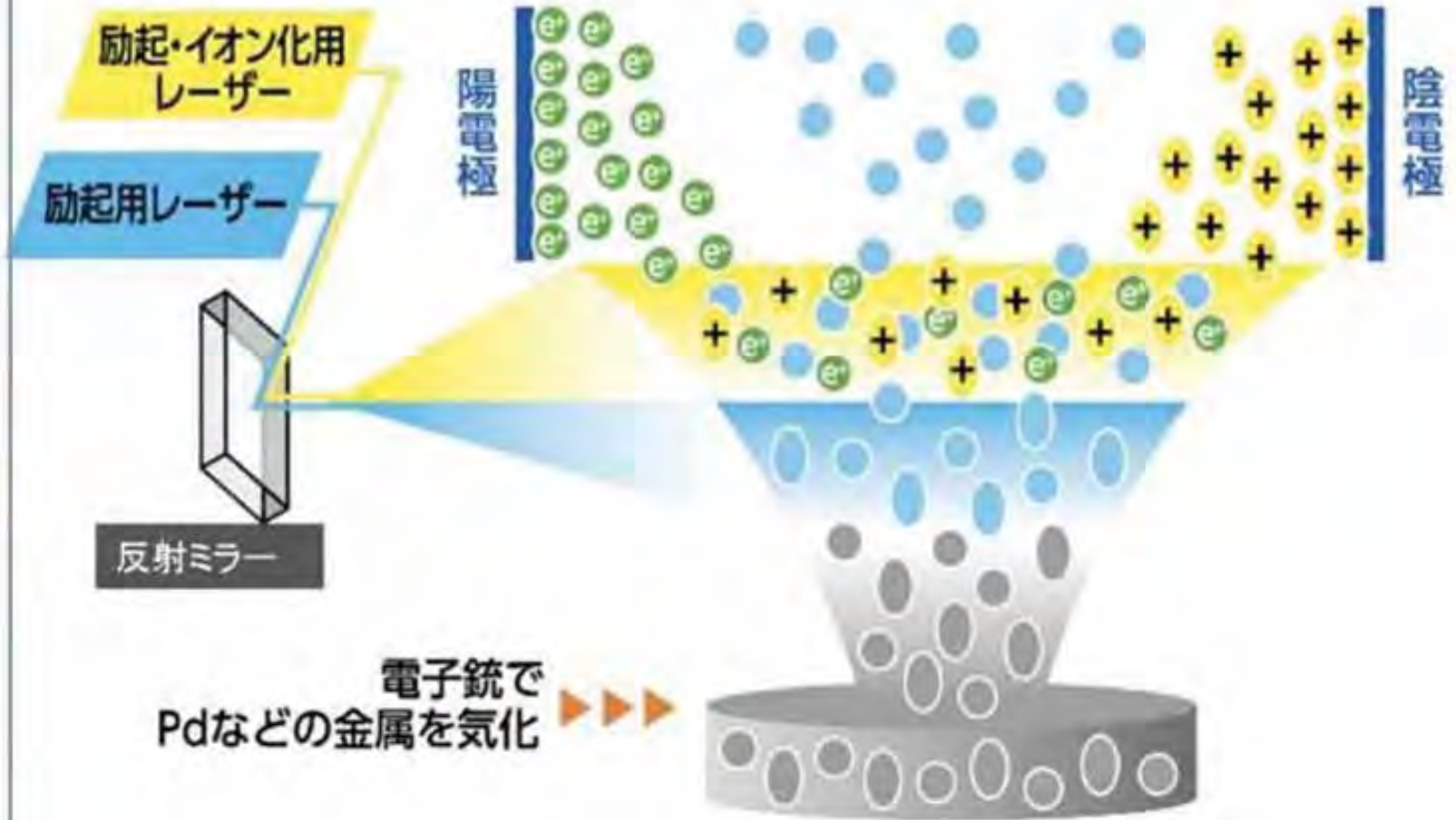
プラントイメージ

# ②プログラムの成果：偶奇分離法

高レベル放射性廃棄物の一例（パラジウム）



レーザーによる偶奇分離のイメージ

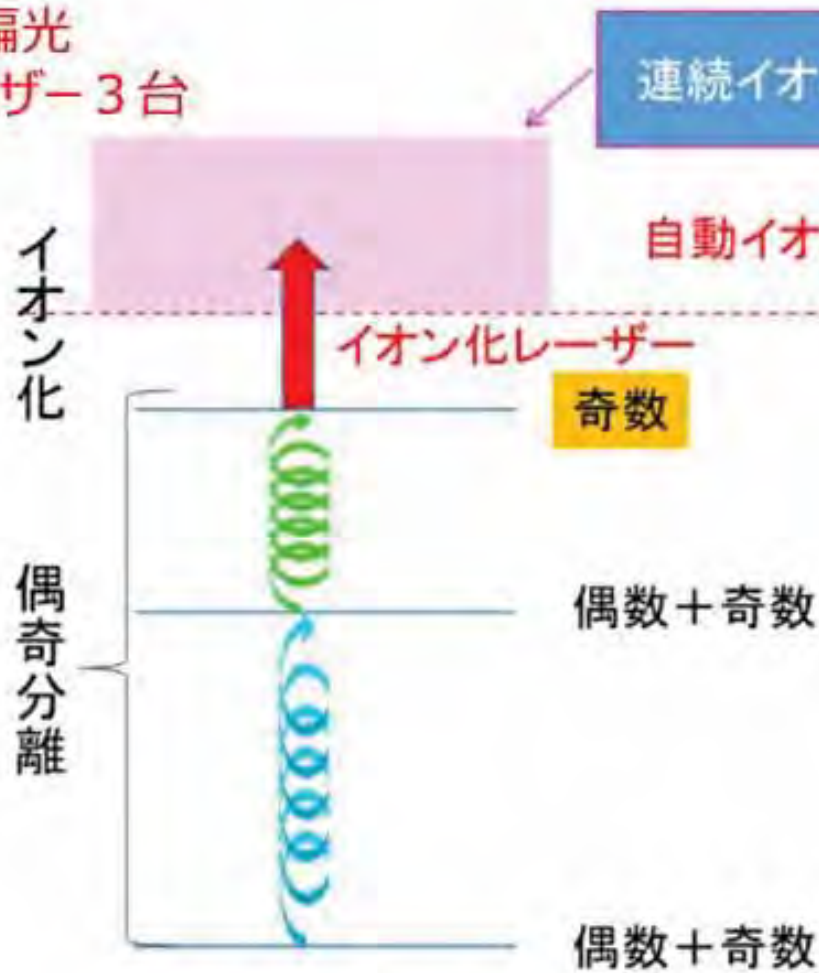


偏光レーザーを用い、パラジウム107やジルコニウム93などの質量数が奇数の核種が光を吸収する性質を利用して、奇数核種をイオン化して取り出し、回収する。

- + イオン化された奇数核種
- e<sup>-</sup> 電子
- 奇数核種
- 偶数核種

# ②プログラムの成果：偶奇分離法

× 円偏光  
 × レーザー 3 台

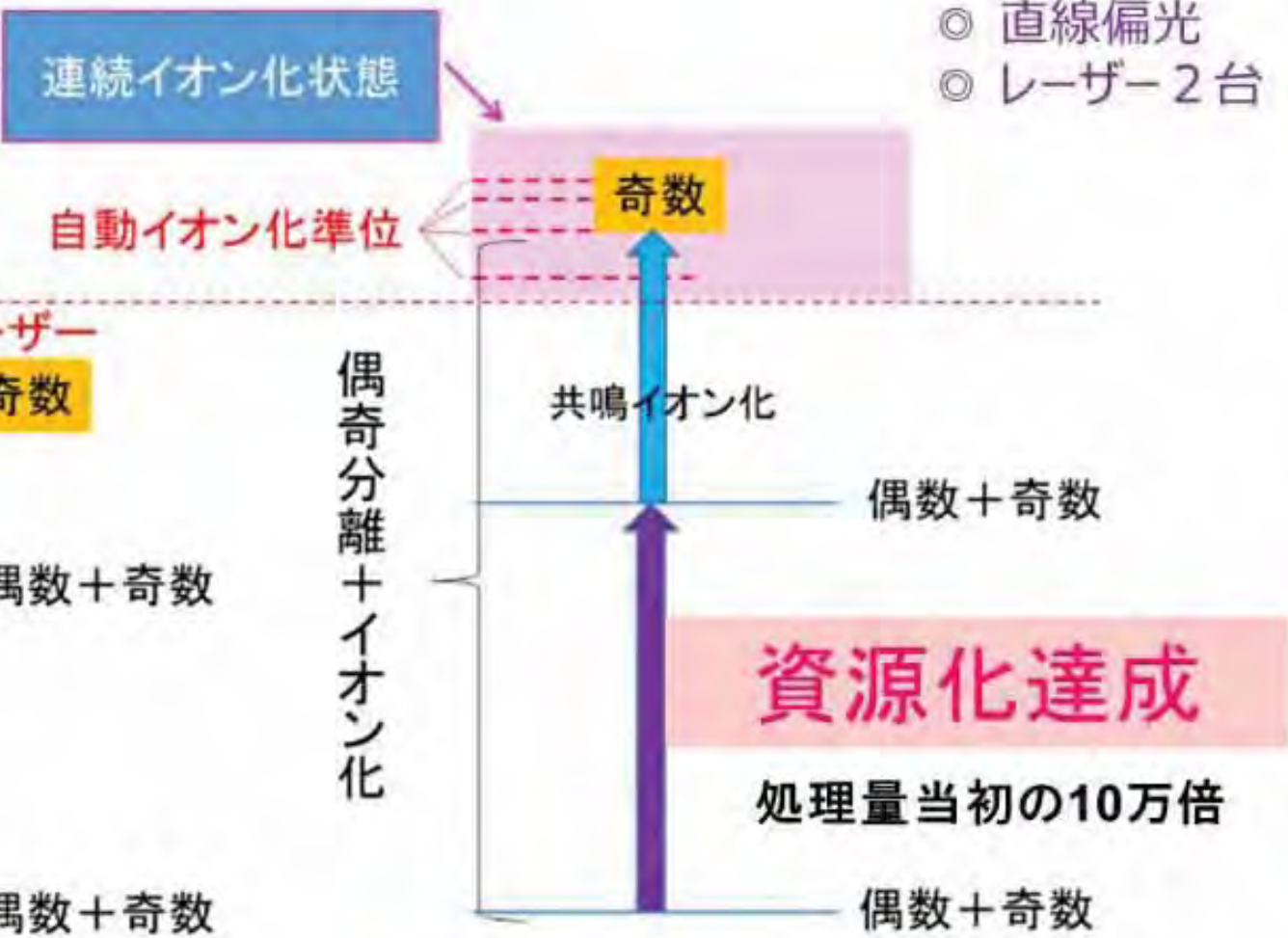


従来の提案  
 2段励起+イオン化

2017年1月10日プレスリリース実施

・ミラー反射に悪影響を受ける円偏光は、  
 多重反射によるレーザー照射体積増加に適さない

○ 直線偏光  
 ○ レーザー 2 台



2レーザー偶奇分離法

本プロジェクトの成果

直線偏光で偶奇分離可能！

- ▶ Pdの同位体のうち、奇数核種のみをレーザー法でイオン化する方法を開発。従来法に比べて処理量を10万倍にすることに成功。偶数核種は放射性物質ではないためそのまま資源として使用可能（実機の1/350規模）。

- ▶ 六ヶ所村の再処理工場から発生する高レベル廃液のPd-107を適用可能。

イオン化し電極に回収後、加速器により安定核種に核変換することによりPdのすべての核種の再利用可能。

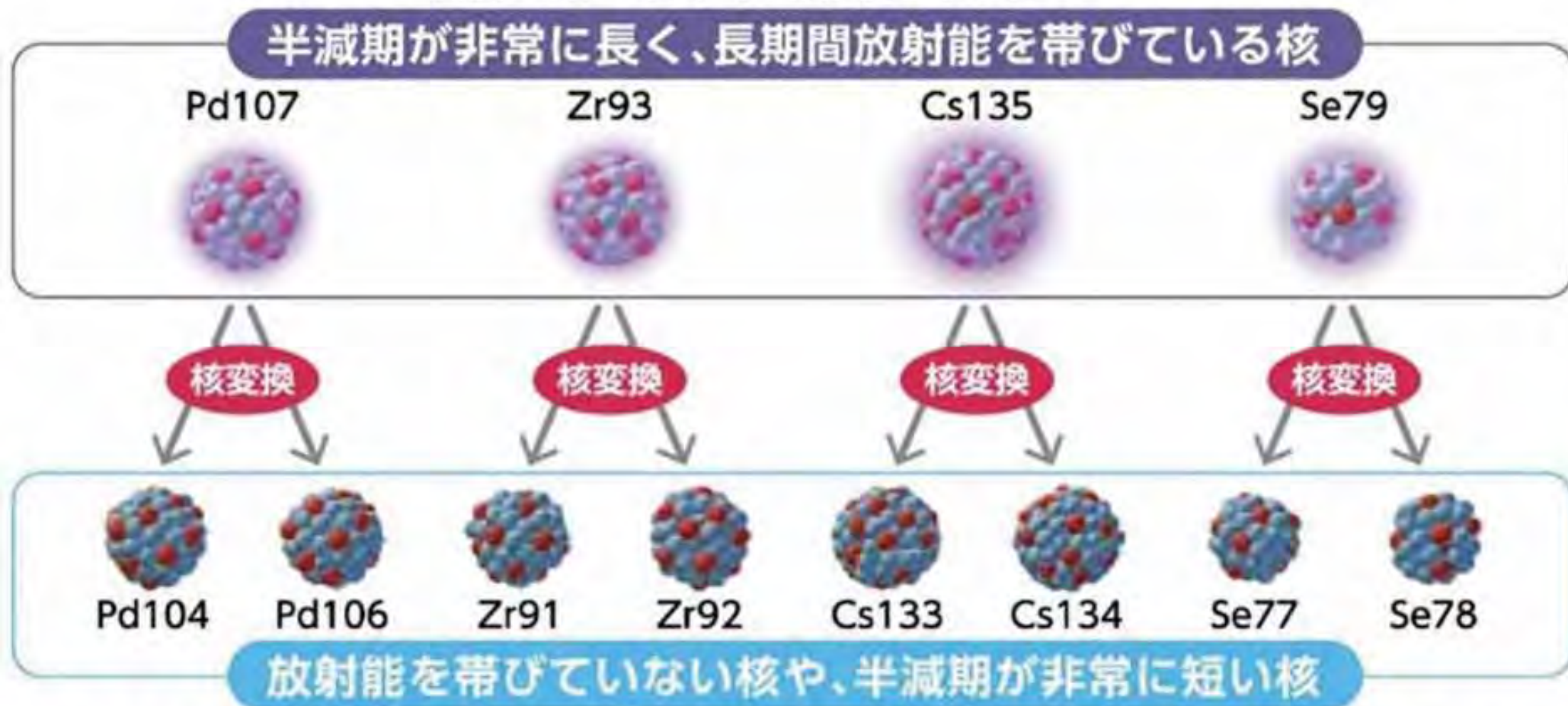


レーザー装置



分離チャンバー

## 加速器で核変換します！



核変換：高レベル放射性廃棄物中の長寿命核種を安定核種もしくは短寿命核種に変換すること、およびそのための技術

資源化・再利用

○: 中性子  
 ●: 陽子

## ②プログラムの成果：パラジウムの核変換イメージ

パラジウム107  
(Pd-107)



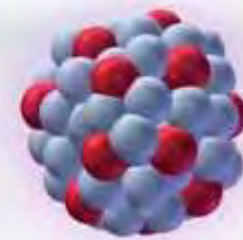
セレン79  
(Se-79)



セシウム135  
(Cs-135)



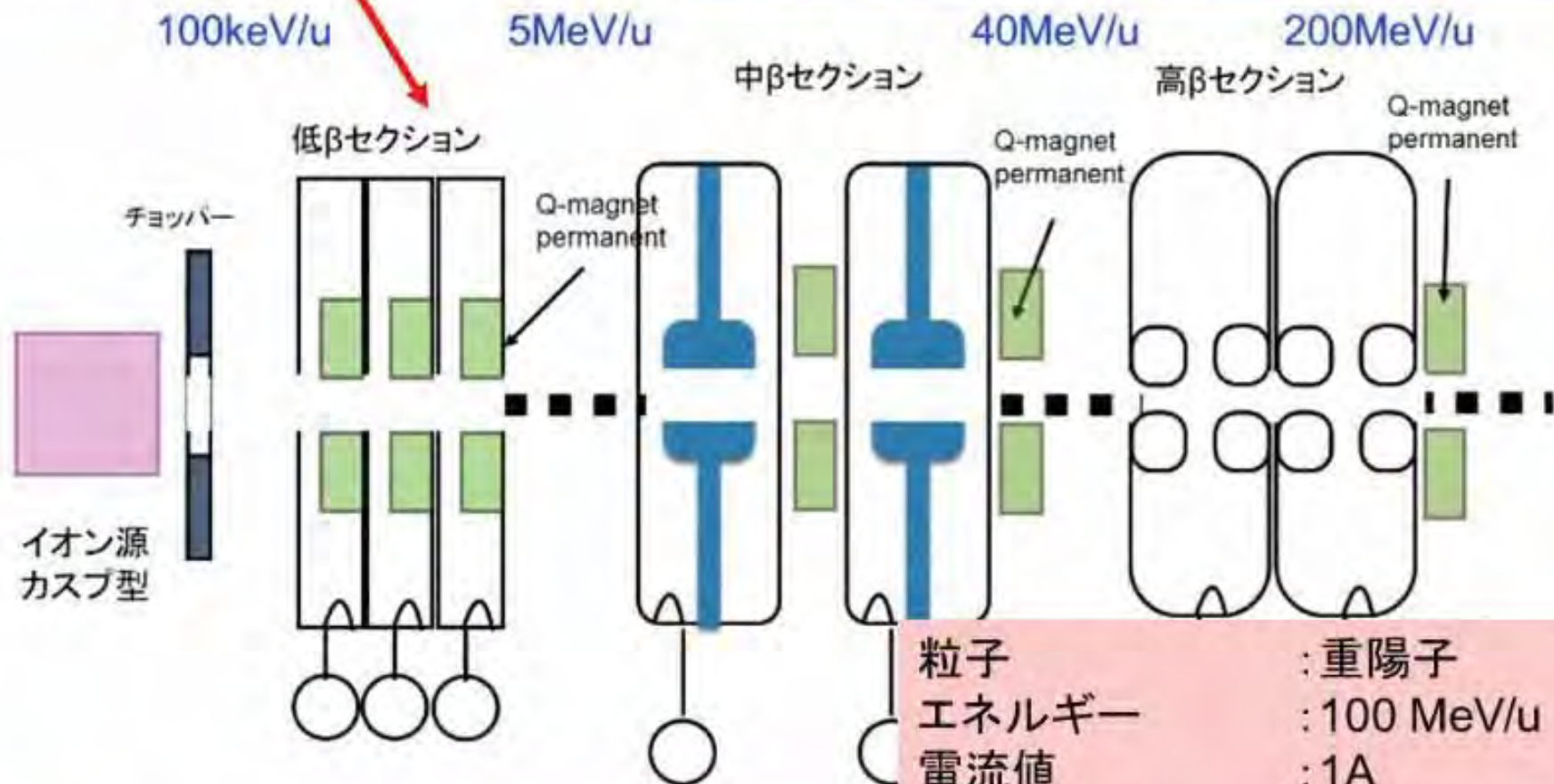
ジルコニウム93  
(Zr-93)



## 処理用加速器仕様決定

RFQqの代わりに、シングルギャップキャビティ+Q磁石を置き、大面積のビームを受けることができる

- 全てシングルセルキャビティにより構成
- ・1台あたりのRfカプラーの数を減らす
- ・大強度ビームに対してrfパワー入れやすくする
- ・rfも位相を自由に選べる



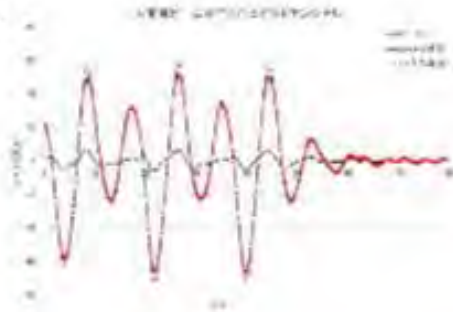
|       |             |
|-------|-------------|
| 粒子    | : 重陽子       |
| エネルギー | : 100 MeV/u |
| 電流値   | : 1A        |
| ビーム径  | : 10 cm 以上  |

加速器WG

処理用加速器イメージ

国内特許出願(2018/1/22)

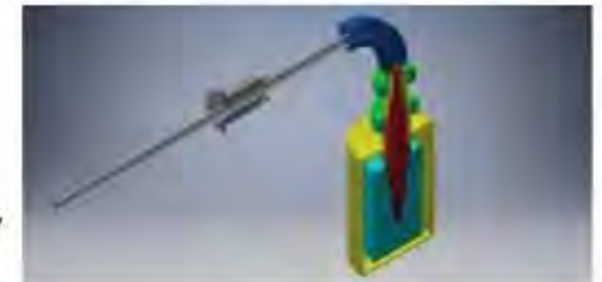
ウェイクポテンシャル  
 計算(三菱電)



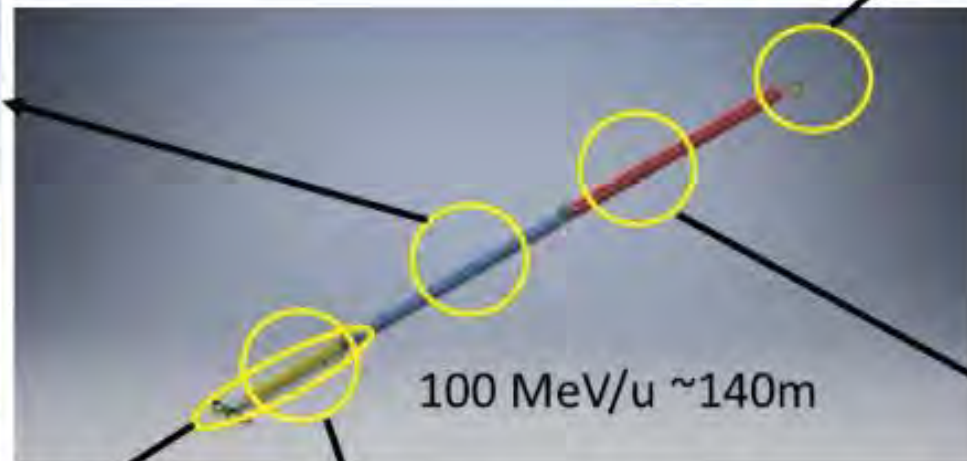
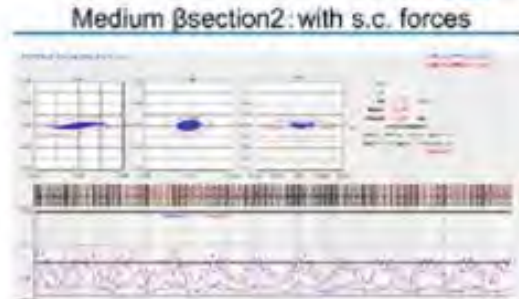
四極永久磁石(日立)



液体リチウム標的(理研)

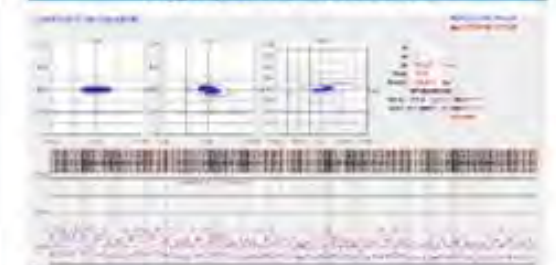


中ベータ(理研)  
 50MHz SC-QWR

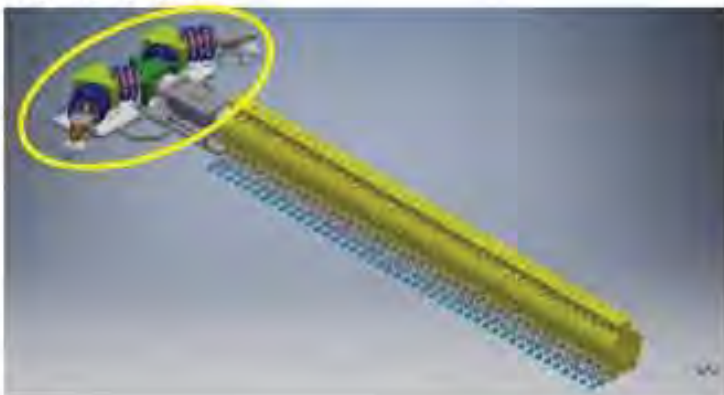


100 MeV/u  $\sim$  140m

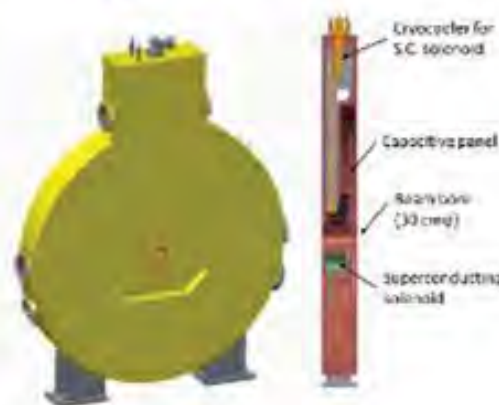
High- $\beta$ : with s.c. forces



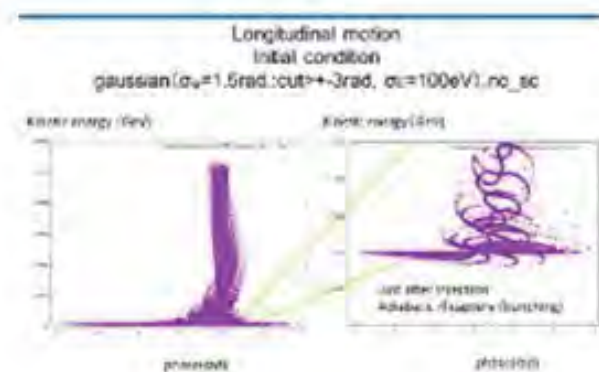
1Aイオン源+輸送系(理研)  
 櫻井、他



低ベータ(京大)  
 25MHz 常伝導RF+SC-solenoid

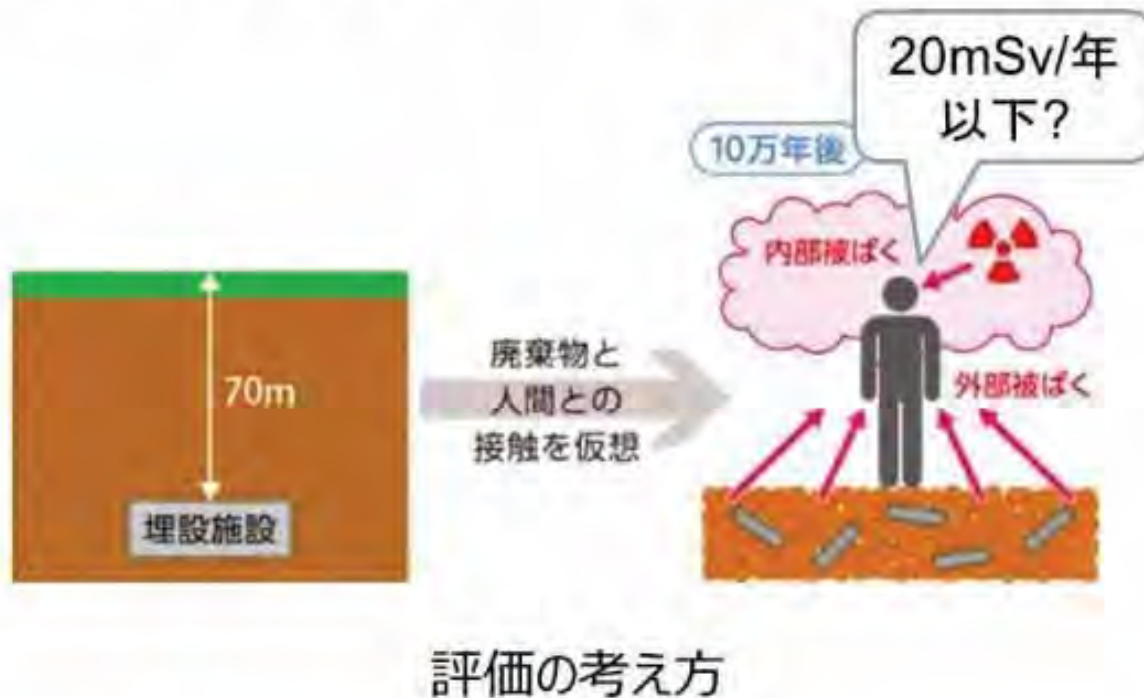


高ベータ(理研)  
 100MHz  
 SC-Re-entrant





## 中深度処分\*の検討(濃度制限シナリオ評価) 評価結果



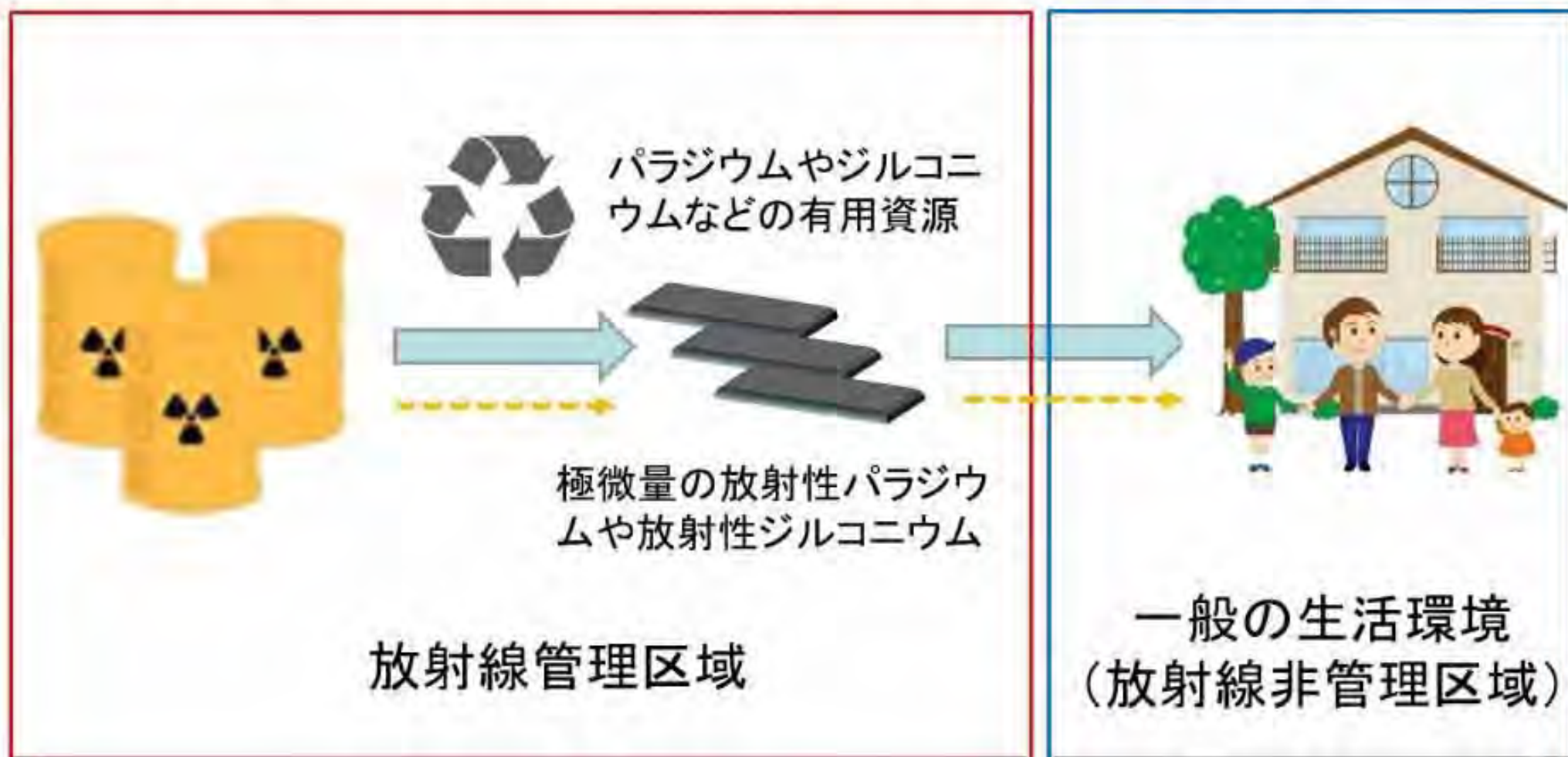
|     |   | 元素  | 線量(mSv/年) |
|-----|---|-----|-----------|
| NG  | } | MA  | 50        |
|     |   | Sn  | N.A.      |
|     |   | Tc  | N.A.      |
|     |   | Nb  | 14        |
| OK! | } | Pd  | 0.05      |
|     |   | Zr  | 0.28      |
|     |   | Se  | 4.9       |
|     |   | Cs  | 4.8       |
|     |   | その他 | 0.00      |
|     |   | 合計  | 39,000    |

緑=本プロジェクトで取り組んだLLFP  
 下線=単独で制限値を超えている元素

- 本プロジェクトで研究対象とした4つのLLFP(パラジウム、ジルコニウム、セレン、セシウム)については制限値を満足した
- 一方、研究対象としていないマイナーアクチノイド(ネプツニウム、アメリシウム等)、スズ、テクネシウムは制限値を上回った。これらについては、既往研究でも取り組まれているが、今後、一層の低減が必要である。

\*中深度処分: 深さ70m~150m以深での処分

高レベル廃棄物から有用資源を取り出し再利用する際の放射線管理



**クリアランスレベル**(どんな使い方をしても健康に問題ない放射能レベル)を設定し、それ以下であれば、放射線管理区域から一般生活環境へ持出しは可能とする(クリアランスレベルの検討)

## LLFPの再利用に伴う放射線被ばく線量の評価と クリアランスレベルの検討

国内におけるパラジウムの産業利用と人が放射線被ばくをする可能性のある経路

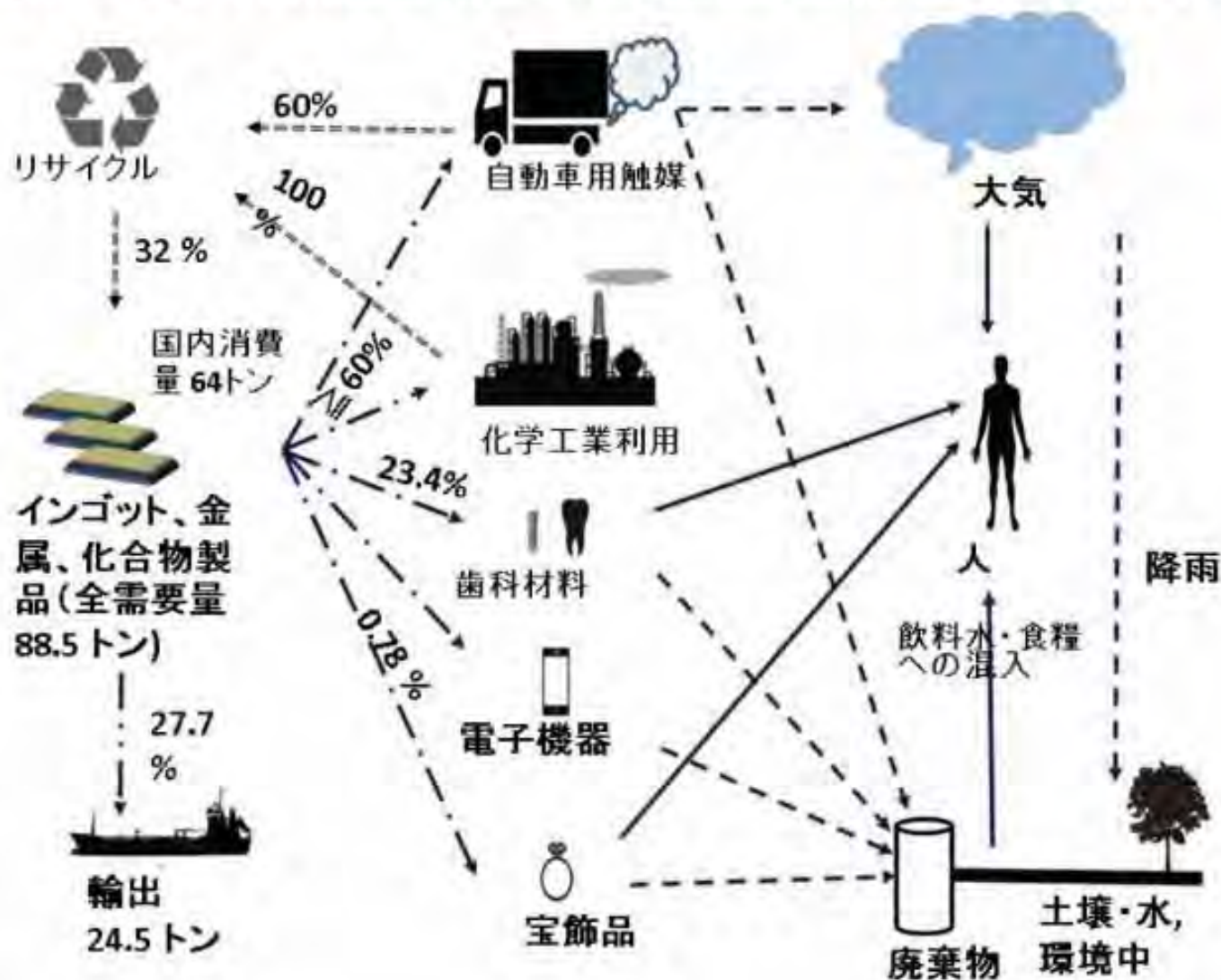


表 107Pdが1Bq/g含まれていた場合の4評価経路における年間の最大放射線被ばく実効線量

| 評価経路               | 最大線量 | 10 $\mu$ Sv/v相当濃度 | 備考            |
|--------------------|------|-------------------|---------------|
| 自動車排ガス触媒<br>微粒子の吸入 |      |                   | 公衆、Class S*   |
| 食品・飲料              |      |                   |               |
| 歯科補綴材              |      |                   | 成人、公衆         |
| パラジウムの加工時<br>の吸入   |      | 5.5 $\times 10^3$ | 成人、公衆、Class S |

**パラジウムのクリアランス  
 レベル: 3000Bq/g  
 セシウムのクリアランス  
 レベル: 0.1Bq/g**

Class S\* :不溶性でゆっくり吸収されるもの

他のシナリオに関する線量目安値(10 $\mu$ Sv/年)相当核種濃度の評価



クリアランスレベル(再使用しても安全なレベル)の制定

2018年10月3日プレスリリース実施

# プログラムの成果：まとめ

- 高レベル放射性廃棄物(HLW)をめぐる課題に関し、偶奇分離法と入射エネルギーを制御した処理用加速器による核変換法を用いることにより経済性のある核変換プロセスを提示し、プラント概念設計することができた。これによりHLWの新しい選択肢を示すことができた。
- LLFPを分離回収する方法として電解法、イオン交換法および溶媒抽出法による組み合わせにより二次廃棄物発生量の少ない経済的なプロセスを提案できた。
- 分離回収されたLLFPはレーザー偶奇分離法により実規模の350分の1の装置を開発できた(Pd)。
- RIBFで取得した種々のLLFPの核反応のデータとPHITSなどによるシミュレーションによりLLFPの重陽子を用いた核変換の経路(パス)を提案すると共にPd-107を用いて実証した
- RIBFやJ-PARCで取得した新しい核変換のデータはデータベース“JENDL/IMPACT-2018”としてまとめた。
- 重陽子の核反応をシミュレーションするコード“DEURACS”を改良した。
- 偶奇分離された奇数核種(例えば、Pd-105とPd-107)は入射エネルギー100MeV/u、入射ビーム1A、ビーム径10cm以上の重陽子ビームを用いる全く新しい処理用加速器による核変換法を提案した。
- 核変換によるLLFPの低減化、CsおよびSrの長期保管、マイナーアクチノイド(MA)の金属燃料高速炉による核変換および中深度処分概念により、HLWを低減できる。
- Pd-107およびZr-93を資源化するためのクリアランスレベルについても各々3300Bq/gおよび90Bq/gと試算し、論文がアクセプトされた。
- HLWからLLFPを分離回収、偶奇分離し、奇数核種を入射エネルギーを制御した処理用加速器で核変換するプラント概念設計することができた。

- **偶奇分離法**: Pd-107で実機の1/350規模装置概念の完成  
⇒ **資源化達成**(経済性の高い実現のある技術)
- 実Pd-107を用いた核反応の**実証試験**による確認
- Pd-107核変換加速器概念の完成  
世界で初めて**処理用加速器概念**の仕様決定と  
プラント概念設計の完成
- **クリアランスレベル**の提案  
世界初の再利用のためのクリアランスレベルの  
提案によりPd-107およびZr-93の**再利用の実現**

- 偶奇分離技術：**医療用加速器**による医療用材料の製造に横展開
- パラジウム (Pd) の資源化：  
科研費やNEDOの公募、ムーンショットに提案
- プレスリリース12件実施  
**海外誌** (World Nuclear News, 2019.3.22) でも取り上げ
- 毎日新聞 (2017.2.11)、日経新聞日曜版 (2018.7.29)  
東洋経済誌 (2019.4.27) などに掲載 (**一般誌43件取り上げ**)

- ImPACT終了時までにはプラント概念を完成させるため、**すべてのPJを並行して進めた**⇒各PLは他のPJ会議に参加
- **基礎研究の知財戦略**を策定  
コンセプト特許；海外出願⇒H30年度**21世紀発明賞**を受賞
- ImPACT後の成果の展開（社会実装やベンチャーの状況等）  
社会実装を**10年前倒し**（2050年⇒2040年）
- その他アピール事項（例：アウトリーチ等のPM自身の活動）  
核燃料サイクル施設（六ヶ所村や青森県）や原子炉のある地域（福井県）で**ワークショップ**や**講演会**を開催し、地元の意見を広く聞き、**プログラムに反映**





(2018年3月17日於JST)

基調講演

「科学技術を使いこなすために  
—科学知と生活知のギャップを  
考える—」

佐倉 統 (東京大学教授)

パネル討論

「高レベル放射性廃棄物の資源化」

ファシリテータ: 岸田一隆 (青山学院大学教授)



- **省庁を超えたImPACTのような大型プログラムが必要**  
省庁のサポートが必要であると既存と同様なプログラムになり、大型プログラムにならない(**省庁を超えることが重要**)
- ImPACTの利点
  - ープレスリリースや原子力で重要なコミュニケーションを目指したワークショップの開催が容易
  - ー分野横断の原子力外の**若手研究者の参画と新しい分野の成果**
  - ー世界における日本の存在感を示す**“概念特許”の海外出願**と国の研究機関や大学の知財戦略への提言
- 特に原子力は福島事故後に体制や将来に向けての**広く意見を聞く**良い機会であったが、規制以外事故前の体制を続けている(原子力が衰退する道筋)  
⇒地元の意見を広く取り入れ、**日本の国情にあった原子力政策**を立てるべき
- 研究開発も本来のあるべき、**ニーズからシーズを掘り起こす形**にすべき。  
日本の事情を顧みないトップダウンの研究開発(従来の原子力)はあり得ない

## 良かった点

- ・PMにすべて権限が任された点  
知財戦略(基本特許が重要である)など、我が国の技術先進国として課題と考えられる点にもチャレンジできたこと
- ・プレスリリースなど広報活動に重点が置かれた点  
ワークショップなどをタイムリーに開催でき、広く成果を周知できたこと
- ・PM補佐およびアシスタントの体制  
PM補佐を複数、かつ各分野のトップに近い方を雇うことができ、世界に対し発信できる新しい成果を出せたこと

## 改善点

- ・JSTは単なる資金管理のみの業務を行い、ITを活用して欲しい  
民間のスピード感や生産性を取り入れられるようにすると共に、以下のような知財出願などのような不要な手続きを無くすことができる
- ・民間出身でも100%JSTの所属としないもしくは所属を選べるようにする  
PMに権限があると言いつつ、JSTの職員であるという扱いで知財出願などに無用な手続きを不要にできる

**ご清聴ありがとうございました**